

Д. Г. Шайсултанов*, Н. Д. Степанов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород

*shaysultanov@bsu.edu.ru

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук Г. А. Салищев

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ V НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeNiMnV_x

В работе была исследована микроструктура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV_x ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) в литом и отожженном состояниях. В обоих состояниях «базовый» сплав CoCrFeNiMn имеет однофазную ГЦК-структуру. Добавление V приводит к образованию в сплаве интерметаллидной сигма фазы, а повышение ее концентрации – к увеличению объемной доли сигма-фазы, и в сплаве CoCrFeNiMnV сигма-фаза становится матричной. Установлено, что увеличение объемной доли сигма-фазы в сплавах CoCrFeNiMnV_x приводит к непрерывному упрочнению и потере пластичности.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, сигма-фаза, микроструктура, механические свойства.

D. G. Shaysultanov, N. D. Stepanov

EFFECT OF V CONCENTRATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE CoCrFeMnNiV_x HIGH ENTROPY ALLOYS

In this work microstructure and mechanical properties of the CoCrFeNiMnV_x ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) high-entropy alloys in as-solidified and annealed conditions were examined. The CoCrFeMnNi alloy was a single-phase fcc solid solution in both conditions. Intermetallic sigma phase formed with V addition, and its volume fraction increased with an increase of V content. In the CoCrFeMnNiV alloy the sigma phase became the matrix phase. It is revealed that increase of the volume fraction of the sigma phase leads to continuous hardening and loss of plasticity of the CoCrFeNiMnV_x alloys.

Keywords: high-entropy alloys, sigma phase, microstructure, mechanical properties.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) – обычно определяются как сплавы, состоящие из пяти и более элементов в равных эквиатомных пропорциях [1]. Большинство существующих ВЭСов имеют основу из переходных металлов Co, Cr, Fe и Ni с добавлением таких элементов, как

Al, Cu, Mn, V, Ti, Mo и т. д. Особое внимание обращено на сплавы, в которых при определенном их сочетании образуются простые твердые растворы. В данном случае однофазная структура твердого раствора наблюдается только в CoCrFeNi и CoCrFeNiMn [2], а добавление в равных эквивалентных пропорциях Al, Cu, V, Ti, Mo и т. д. приводит к формированию упорядоченных и интерметаллидных фаз [3]. К сожалению, причины дестабилизации твердого раствора при легировании различными элементами не вполне ясны [4]. Однако лучшего понимания влияния химического состава на формирование фаз в ВЭСх можно достичь путем изучения влияния легирования «базового» сплава с однофазной структурой твердого раствора, как, например, CoCrFeNi и CoCrFeMnNi, с различными концентрациями элементов, вызывающих образование дополнительных фаз. Такие исследования могут быть полезны не только для понимания формирования твердого раствора или упорядоченных/интерметаллических фаз в ВЭСх, но также и для создания композиций с многообещающими свойствами.

В связи с вышесказанным целью данной работы является исследование влияния концентрации V на микроструктуру сплавов CoCrFeMnNiV_x и установление взаимосвязи между их микроструктурой и механическими свойствами.

Сплавы CoCrFeNiMn, CoCrFeNiMnV_{0,25}, CoCrFeNiMnV_{0,5}, CoCrFeNiMnV_{0,75} и CoCrFeNiMnV были получены методом дуговой плавки чистых элементов при низком давлении и литьем в водоохлаждаемую медную изложницу в атмосфере чистого аргона. Для обеспечения химической однородности слитки переплавляли не менее пяти раз. Полученные слитки имели размеры 6×15×50 мм³. Сплавы были исследованы в литом состоянии и после гомогенизационного отжига при 1000 °С в течение 24 часов. Перед отжигом образцы запаивались в вакуумную (10⁻² Торр) кварцевую трубку со стружкой титана для предотвращения окисления. Микротвердость образцов измеряли с использованием 136-градусной алмазной пирамиды под нагрузкой 250 г. В течение 15 с. Испытания на сжатие проводились на прямоугольных образцах с размерами 7×5×5 мм³. Начальная скорость деформации была 10⁻³ с⁻¹.

Сплав CoCrFeNiMn в литом состоянии имеет дендритную структуру. По результатам ЭДС анализа дендритные области в литом сплаве CoCrFeNiMn отличаются повышенным содержанием элементов с высокой температурой плавления (21–22 ат. %) Co, Cr и Fe, а междендритные прослойки обогащены легкоплавкими Ni (22,9 ат. %) и Mn (26,6 ат. %). При этом, согласно данным ПЭМ, дендриты и междендритные области имеют одну и ту же ГЦК-решетку. При добавлении V (x = 0,25) сплав по-прежнему имеет однофазную ГЦК-кристаллическую структуру. Установлено, что дальнейшее повышение V приводит к изменению

фазового состава сплавов и усложнению их структуры. Показано, что при содержании V ($x = 0,5$ и $0,75$) в матрице и по границам зерен наблюдается выделение светлых частиц неправильной формы с объемной долей 20 % и 37 %, соответственно. Методами РСА и ПЭМ светлая фаза была определена как тетрагональная σ -фаза, содержащая повышенное количество Cr и V. Структура сплава CoCrFeNiMnV в литом состоянии состоит из зерен σ -фазы. Вторым компонентом в сплавах является ГЦК-фаза, распределенная толстым слоем вдоль границ зерен и обогащенная Ni. Кроме того, внутри зерен наблюдаются мелкие выделения ГЦК фазы в виде пластин. По данным ПЭМ частицы внутри зерен имеют ту же решетку и состав, что и фаза по границам зерен, следовательно, сплав состоит только из двух фаз.

После гомогенизации сплав CoCrFeNiMn трансформируется в зеренную ГЦК-структуру. Отжиг сплава CoCrFeNiMnV_{0,25} приводит к выделению частиц (до 2 %) σ -фазы предпочтительно по границам зерен. Более сложная структура наблюдается в сплаве системы CoCrFeNiMnV_{0,5}. В матрице присутствуют два типа частиц σ -фазы с одинаковым химическим составом: равноосные и линзообразные. Структура сплава CoCrFeNiMnV_{0,75} после отжига подобна структуре в литом состоянии. Однако в отожженном состоянии увеличивается объемная доля σ -фазы до 48 %. Отжиг оказывает существенное влияние на морфологию микроструктуры сплава CoCrFeNiMnV. В сплаве сохраняется ГЦК-фаза, но вместо непрерывной «сетки», как в литом состоянии, теперь наблюдаются отдельные крупные частицы со сложной формой. ГЦК частицы внутри зерен σ -фазы также становятся заметно крупнее по сравнению с литым состоянием и приобретают достаточно равноосную форму. В отличие от всех предыдущих сплавов, в CoCrFeNiMnV матрицей является σ -фаза, обогащенная Cr (20,0 ат. %) и V (18,6 ат. %) и обедненная с Ni (13,5 ат. %), а частицы имеют ГЦК-структуру с повышенным содержанием Ni (25 ат. %). Объемная доля частиц составляет около 28 %.

С повышением концентрации V наблюдается увеличение микротвердости сплавов в литом и гомогенизированном состояниях, а именно от 144 HV (V_0) до 650 HV (V_1) и от 135 HV (V_0) до 636 HV (V_1) соответственно. Проведенные механические испытания на сжатие отожженных сплавов показали, что сплавы CoCrFeNiMn и CoCrFeNiMnV_{0,25} имеют низкий предел текучести и высокую пластичность (200 и 230 МПа, >75 %). Добавление V ($x = 0,5$) резко повышает предел прочности до 620 МПа, при этом сохраняется высокая пластичность. Более высокий предел прочности и низкая пластичность наблюдается в сплавах с высоким содержанием V. В сплавах CoCrFeNiMnV_{0,75} и CoCrFeNiMnV предел текучести возрастает до 740 и 1660 МПа, а пластичность снижается до 7,8 % и 0,5 % соответственно. Предел прочности сплава CoCrFeNiMnV_{0,75} составляет 1325 МПа, а сплава CoCrFeNiMnV – 1842 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yeh J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys // JOM. 2013. V. 35. № 12. P. 1759–1771.
2. Wang Y. P., Li B. S., Heng Z. F. Solid solution or intermetallics in a high-entropy alloy // Adv. Eng. Mater. 2009. V. 11. № 8. P. 641–644.
3. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy / S. Singh [et al.] // Acta Mater. 2011. V. 59. P.182–190.
4. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys / F. Otto [et al.] // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 2628–2638.